

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein damit durchführbares Verfahren zum Ätzen eines Substrates, insbesondere eines Siliziumkörpers, mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas nach der Gattung der unabhängigen Ansprüche.

Stand der Technik

Um ein anisotropes Hochratenätzenverfahren beispielsweise für Silizium unter Einsatz einer induktiven Plasmaquelle zu realisieren, ist es bei Verfahren, wie sie beispielsweise aus DE 42 41 045 C2 bekannt sind, erforderlich, in möglichst kurzer Zeit eine effiziente Seitenwandpassivierung während sogenannter Passivierschritte durchzuführen und ferner eine möglichst hohe Konzentration von Silizium ätzenden Fluorradikalen während sogenannter Ätzschritte zu erreichen. Zur Erhöhung der Ätzrate ist es dabei naheliegend, mit möglichst hohen Hochfrequenzleistungen an der induktiven Plasmaquelle zu arbeiten und dadurch möglichst hohe Plasmaleistungen in das erzeugte induktiv gekoppelte Plasma einzukoppeln.

Diesen eingekoppelbaren Plasmaleistungen sind jedoch Grenzen gesetzt, die sich einerseits aus der Belastbarkeit der elektrischen Komponenten der Plasmaquelle ergeben, andererseits aber auch prozeßtechnischer Natur sind. So verstärken hohe Hochfrequenzleistungen der induktiven Plasmaquelle, d. h. hohe einzukoppelnde Plasmaleistungen, schädliche elektrische Eingriffe aus dem Quellenbereich in das erzeugte induktiv gekoppelte Plasma, die die Ätzergebnisse auf dem Substratwafer verschlechtern.

Zudem treten bei Ätzprozessen nach Art der DE 42 41 045 C2 bei sehr hohen Plasmaleistungen auch Stabilitätsprobleme bei der Plasmaeinkoppelung in den Umschaltphasen zwischen Ätz- und Passivierschritten auf. Dies beruht darauf, daß sich bei hohen einzukoppelnden Leistungen im kWatt-Bereich während der Umschaltphasen auftretende Leistungsreflexionen und Spannungsüberhöhungen zerstörerisch im elektrischen Kreis der Plasmaquelle (Spule, angeschlossene Kapazitäten, Generatorendstufe usw.) auswirken.

In der Anmeldung DE 199 00 179 ist dazu bereits eine gegenüber der DE 42 41 045 C2 weiterentwickelte induktive Plasmaquelle beschrieben, die mittels einer verlustfreien symmetrischen Hochfrequenzspeisung der Spule der induktiven Plasmaquelle für besonders hohe Plasmaleistungen geeignet ist, und die ein induktives Plasma generiert, welches besonders arm an Störeinkopplungen ist. Doch auch für diesen Quellentyp existiert eine praktikable Leistungsgrenze von etwa 3 kWatt bis 5 kWatt, oberhalb der die benötigten Hochfrequenzkomponenten extrem teuer werden oder Probleme hinsichtlich der Plasmastabilität überhand nehmen.

Aus der Anmeldung DE 199 19 832 ist weiter bereits bekannt, die in ein induktiv gekoppeltes Plasma mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld eingekoppelte Plasmaleistung adiabatisch zwischen einzelnen Verfahrensschritten, insbesondere alternierenden Ätz- und Passivierschritten, zu variieren.

Ein derartiger adiabatischer Leistungsübergang, d. h. ein allmähliches Hochfahren bzw. Verringern der eingekoppelten Plasmaleistung, bei gleichzeitiger kontinuierlicher Anpassung der Impedanz der ICP-Quelle an die jeweilige, von der eingekoppelten Plasmaleistung abhängige Plasmaimpedanz mittels eines automatischen Anpassnetzwerkes oder eines Impedanztransformators ("Matchbox") ermöglicht es, die erläuterten Probleme hinsichtlich Leistungsreflexion

und Spannungsüberhöhung beim Ein- und Ausschalten von Plasmaleistungen im Bereich von 1 kWatt bis 5 kWatt zu beherrschen. Eine typische Zeitdauer der Einschaltvorgänge liegt dabei jedoch im Bereich von 0,1 sec bis 2 sec. Schnellere Leistungsänderungen sind mit diesem Ansatz nicht möglich.

Vorteile der Erfindung

Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das damit durchgeführte Verfahren hat gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil, daß damit eine variabel einstellbare, gepulste Hochfrequenzleistung erzeugt wird, die als Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma einkoppelbar ist, wobei die Pulsung der Plasmaleistung sehr schnell, beispielsweise innerhalb von Mikrosekunden, erfolgen und gleichzeitig mit Leistungsänderungen von mehreren tausend Watt verbunden sein kann.

Die vorgenommene Pulsung der Plasmaleistung ist weiter mit einer wesentlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der ICP-Quelle verbunden und eröffnet die Möglichkeit zur Verminderung der mittleren Plasmaleistung ohne Ätzratenverminderung bzw. zur Ätzratenerhöhung bei unveränderter mittlerer Plasmaleistung. Weiter lassen sich durch das Pulsen der Plasmaleistung elektrische Störeffekte aus dem Quellenbereich der ICP-Quelle wirksam reduzieren.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen genannten Maßnahmen.

So ist es besonders vorteilhaft, wenn die erfindungsgemäße Plasmaätzanlage mit einer balancierten, symmetrisch aufgebauten und symmetrisch gespeisten Konfiguration der ICP-Quelle versehen ist. Auf diese Weise wird die Homogenität der Ätzraten über die Oberfläche des Substrates deutlich verbessert und die elektrische Einkopplung von hohen Plasmaleistungen in das erzeugte Plasma erheblich vereinfacht.

Weiterhin ist vorteilhaft, wenn im Inneren des Reaktors ein zusätzliches, konstantes oder zeitlich variierendes longitudinales Magnetfeld erzeugt wird, das das generierte, induktiv gekoppelte Plasma von der Plasmaquelle ausgehend nach der Art einer magnetischen Flasche bis zu dem zu ätzenden Substrat führt.

Dieses Magnetfeld, dessen Richtung zumindest näherungsweise oder überwiegend parallel zu der durch die Verbindungslinie von Substrat und induktiv gekoppeltem Plasma definierten Richtung ist, verbessert die Ausnützung der eingekoppelten Hochfrequenzleistung zur Erzeugung der gewünschten Plasmaspezies (Elektronen, Ionen, freie Radikale) d. h. die Effizienz der Plasmageneration deutlich. Daher sind bei gleicher Plasmaleistung damit zusätzlich deutlich höhere Ätzraten möglich.

Eine besonders gute Führung des erzeugten Plasmas durch das Magnetfeld und ein besonders geringer Durchgriff des erzeugten Magnetfeldes auf das zu ätzende Substrat selbst ergibt sich weiter vorteilhaft dann, wenn zusätzlich eine zu der Innenwand des Reaktors konzentrisch angeordnete Apertur vorgesehen ist, die bevorzugt ca. 5 cm oberhalb des auf einer Substratelektrode angeordneten Substrates angeordnet ist. Diese Apertur führt zu einer verbesserten Uniformität der Ätzung über die Substratoberfläche und vermeidet gleichzeitig im Fall eines zeitlich variierenden Magnetfeldes hohe induzierte Spannungen in dem zu ätzenden Substrat, die dort unter Umständen zu Schäden an elektronischen Bauelementen führen.

Sehr vorteilhaft ist weiterhin, wenn in den ICP-Spulen-generator Bauteile integriert sind, die zur Impedanzanpassung als Funktion der einzukoppelnden Plasmaleistung eine Variation der Frequenz des erzeugten elektromagnetischen

Wechselfeldes vornehmen, da damit eine besonders schnelle Umschaltung zwischen Plasmaleistungspulsen und Pulsphasen erreicht wird.

Durch diese Frequenzvariation wird vorteilhaft vermieden, daß zeitweise beim Pulsen der Plasmaleistung, insbesondere in Zeiten einer sich schnell ändernden eingekoppelten Plasmaleistung, d. h. bei Pulse-zu-Pause-Übergängen, hohe reflektierte Leistungen zurück in den ICP-Spulengenerator auftreten. Dabei liegt ein weiterer wesentlicher Vorteil einer jederzeit möglichst guten Impedanzanpassung über eine variable Frequenz der Hochfrequenzleistung des ICP-Spulengenerators darin, daß diese Frequenzänderung sehr schnell durchgeführt werden kann, da sie nur durch die Regelschwindigkeit einer die Frequenzvariation durchführenden elektronischen Schaltung begrenzt ist. So sind Reaktionszeiten oder sehr schnelle Leistungsänderungen der Ausgangsleistung des ICP-Spulengenerators im Mikrosekundenbereich stabil möglich, was es erlaubt, während der Ätz- und/oder Passivierschritte mit Plasmaleistungspulsen zu arbeiten, deren Dauer im Mikrosekundenbereich liegt.

Da bei einem gepulsten Betrieb der ICP-Quelle sehr schnelle Impedanzänderungen im Plasma auftreten, ist es nach dem bisherigen Stand der Technik bei Einzelpulsleistungen im kWatt-Bereich, insbesondere im Bereich oberhalb 3 kWatt unmöglich, das Auftreten hoher reflektierter Leistung beim Ein- und Ausschalten der eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulse zu vermeiden oder diese zumindest unschädlich zu machen. Durch die erfindungsgemäße Vorrichtung ist dagegen auch in diesem Fall die Impedanzanpassung von induktiv gekoppeltem Plasma bzw. ICP-Quelle und ICP-Spulengenerator jederzeit sichergestellt.

Ein gepulster Betrieb der ICP-Quelle hat gegenüber einem kontinuierlichen Betrieb weiter den wesentlichen Vorteil, daß während der Hochfrequenzleistungspulse bzw. Plasmaleistungspulse eine wesentlich höhere Plasmadichte erreicht wird als bei einem kontinuierlichen Betrieb. Dies beruht darauf, daß die Erzeugung eines induktiven Plasmas ein hochgradig nichtlinearer Vorgang ist, so daß die mittlere Plasmadichte in diesem gepulsten Betriebsmodus höher ist als bei einer dem Zeitmittel entsprechenden mittleren Plasmaleistung. Man erhält daher, bezogen auf das Zeitmittel, im Pulsbetrieb effektiv mehr reaktive Spezies und Ionen als im Dauerstrichbetrieb. Dies gilt insbesondere dann, wenn sogenannte "Riesenimpulse" eingesetzt werden, d. h. relativ kurze und extrem leistungsstarke Hochfrequenzleistungsimpulse von beispielsweise 20 kWatt Spitzenleistung, wie dies mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung nunmehr möglich ist, wobei die mittlere Plasmaleistung im Zeitmittel dann beispielsweise bei lediglich 500 Watt liegt.

In diesem Fall sind im übrigen unvermeidbare Wärmeverluste im ICP-Spulengenerator und anderen Anlagenkomponenten der Plasmaätzanlage vorteilhaft mit dem relativ niedrigen Zeitmittelwert der Plasmaleistung korreliert, während erwünschte Plasmaeffekte, insbesondere die erzielbaren Ätzraten, vorteilhaft mit den auftretenden Spitzenleistungen korrelieren. Infolgedessen wird die Effizienz der Erzeugung reaktiver Spezies und Ionen deutlich verbessert.

Ein weiterer Vorteil eines gepulsten Betriebs der ICP-Quelle liegt darin, daß sich in den Pausen zwischen den Hochfrequenzleistungspulsen störende elektrische Aufladungen auf dem zu ätzenden Substrat entladen können und damit die Profilkontrolle beim Ätzen insgesamt verbessert wird.

Schließlich ist sehr vorteilhaft, wenn das Pulsen des erzeugten Magnetfeldes mit dem Pulsen der eingekoppelten Plasmaleistung und/oder dem Pulsen der über den Substratspannungsgenerator in das Substrat eingekoppelten Hoch-

frequenzleistung zeitlich korreliert oder synchronisiert wird. So ergibt sich durch die zeitliche Synchronisation der Pulsung von Magnetfeld und eingekoppelter Plasmaleistung insbesondere eine deutliche Reduktion der in der Magnetfeldspule anfallende Ohmschen Wärmeverluste, was Probleme der Kühlung und Temperaturkontrolle der Magnetfeldspule entschärft.

Wird beispielsweise die eingekoppelte Plasmaleistung mit einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1 : 20 betrieben, so kann auch der Strom durch die Magnetfeldspule beispielsweise mit einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1 : 18 gepulst werden, wodurch sich vorteilhaft die benötigte Wärmeabfuhr aus der Magnetfeldspule auf 1/18 des ursprünglichen Werts reduziert. Gleichzeitig sinkt auch der Verbrauch an elektrischer Energie entsprechend.

Zeichnungen

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden anhand der Zeichnungen und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen Fig. 1 eine schematisierte Plasmaätzanlage, Fig. 2 eine elektronische Rückkopplungsschaltung mit angeschlossener ICP-Quelle, Fig. 3 ein Beispiel für eine Filterkennlinie, Fig. 4 ein Beispiel für eine zeitliche Synchronisation von in das Plasma eingekoppelten Hochfrequenzplasmaleistungspulsen mit Magnetfeldpuls, Fig. 5 eine in den Substratspannungsgenerator integrierbare Schaltungsanordnung zur Erzeugung sehr kurzer Hochfrequenzleistungspulse, Fig. 6 ein Ersatzschaltbild für die Entstehung der Substratelektrodenspannung und Fig. 7 die Änderung der Substratelektrodenspannung während eines Hochfrequenzleistungspulses als Funktion der Zahl der Schwingungsperioden.

Ausführungsbeispiele

Ein erstes Ausführungsbeispiel der Erfindung wird anhand der Fig. 1 näher erläutert. Eine Plasmaätzanlage 5 weist dazu zunächst einen Reaktor 15 auf, in dessen oberem Bereich in an sich bekannter Weise über eine ICP-Quelle 13 ("Inductively Coupled Plasma") ein induktiv gekoppeltes Plasma 14 erzeugt wird. Weiterhin ist eine Gaszufuhr 19 zur Zufuhr eines Reaktivgases wie beispielsweise SF_6 , ClF_3 , O_2 , C_4F_8 , C_3F_6 , SiF_4 oder NF_3 , eine Gasabfuhr 20 zur Abfuhr von Reaktionsprodukten, ein Substrat 10, beispielsweise ein mit dem erfindungsgemäßen Ätzverfahren zu strukturierender Siliziumkörper oder Siliziumwafer, eine mit dem Substrat 10 in Kontakt befindliche Substratelektrode 11, ein Substratspannungsgenerator 12 und ein erster Impedanztransformator 16 vorgesehen. Der Substratspannungsgenerator 12 koppelt dabei in die Substratelektrode 11 und darüber in das Substrat 10 eine hochfrequente Wechselspannung oder Hochfrequenzleistung ein, die eine Beschleunigung von in dem induktiv gekoppelten Plasma 14 erzeugten Ionen auf das Substrat 10 hin bewirkt. Die in die Substratelektrode 11 eingekoppelte Hochfrequenzleistung bzw. Wechselspannung liegt typischerweise zwischen 3 Watt und 50 Watt bzw. 5 Volt und 100 Volt im Dauerstrichbetrieb bzw. bei gepulstem Betrieb jeweils im Zeitmittel über die Pulssequenz.

Weiterhin ist ein ICP-Spulengenerator 17 vorgesehen, der mit einem zweiten Impedanztransformator 18 und darüber mit der ICP-Quelle 13 in Verbindung steht. Somit generiert die ICP-Quelle 13 ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld und darüber in dem Reaktor 15 ein induktiv gekoppeltes Plasma 14 aus Reaktiven Teilchen und elektrisch geladenen Teilchen (Ionen), die durch Einwirken des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf das Re-

aktivgas entstehen. Die ICP-Quelle 13 weist dazu eine Spule mit mindestens einer Windung auf.

Der zweite Impedanztransformator 18 ist bevorzugt in der in der Anmeldung DE 199 00 179.0 vorgeschlagenen Weise ausgeführt, so daß eine balancierte, symmetrisch aufgebaute Konfiguration und Speisung der ICP-Quelle 13 über den ICP-Spulengenerator 17 gegeben ist. Damit wird insbesondere gewährleistet, daß die an den beiden Enden der Spule der ICP-Quelle 13 anliegenden hochfrequenten Wechselspannungen zumindest nahezu gegenphasig zueinander sind. Weiter ist der Mittelabgriff 26 der Spule der ICP-Quelle 13, wie in Fig. 2 angedeutet, bevorzugt geerdet.

Mit der Plasmaätzanlage 5 wird weiter beispielsweise der aus DE 42 41 045 C2 bekannte anisotrope Hochratenätzprozeß für Silizium mit alternierenden Ätz- und Passivierschritten durchgeführt. Hinsichtlich weiterer, dem Fachmann an sich bekannter Details zu der Plasmaätzanlage 5, die insoweit als bisher beschrieben aus dem Stand der Technik bekannt ist, und des damit durchgeführten Ätzverfahrens, insbesondere hinsichtlich der Reaktivgase, der Prozeßdrücke und der Substratelektrodenspannungen in den jeweiligen Ätzschritten bzw. Passivierschritten sei daher auf die DE 42 41 045 C2 verwiesen.

Die erfindungsgemäße Plasmaätzanlage 5 ist im übrigen auch geeignet für eine Prozeßführung, wie sie in der Anmeldung DE 199 27 806.7 beschrieben ist.

Insbesondere wird beim Ätzen des Substrates 10 während der Passivierschritte in dem Reaktor 15 mit einem Prozeßdruck von 5 µbar bis 20 µbar und mit einer über die ICP-Quelle 13 in das Plasma 14 eingekoppelten mittleren Plasmaleistung von 300 bis 1000 Watt passiviert. Als Passiviergas eignet sich beispielsweise C_4F_8 oder C_3F_6 . Während der nachfolgenden Ätzschritte wird dann ein Prozeßdruck von 30 µbar bis 50 µbar und einer hohen mittleren Plasmaleistung von 1000 bis 5000 Watt geätzt. Als Reaktivgas eignet sich beispielsweise SF_6 oder ClF_3 . Unter mittlerer Plasmaleistung wird dabei im Sinne der Erfindung stets eine zeitlich über eine Vielzahl von Plasmaleistungspulsen gemittelte eingekoppelte Plasmaleistung verstanden.

Weiterhin ist in der Plasmaätzanlage 5 zwischen dem induktiv gekoppelten Plasma 14 bzw. der ICP-Quelle 13, d. h. der eigentlichen Plasmaerregungszone, und dem Substrat 10 ein sogenannter "Spacer" als Distanzstück 22 aus einem nichtferromagnetischen Material wie beispielsweise Aluminium plaziert. Dieses Distanzstück 22 ist in die Wand des Reaktors 15 konzentrisch als Distanzring eingesetzt und bildet somit bereichsweise die Reaktorwand. Er hat eine typische Höhe von ca. 5 cm bis 30 cm bei einem typischen Durchmesser des Reaktors 15 von 30 cm bis 100 cm.

Das Distanzstück 22 wird in bevorzugter Ausgestaltung des Ausführungsbeispiels weiter von einer Magnetfeldspule 21 umgeben, die beispielsweise 100 bis 1000 Windungen aufweist und aus einem für die einzusetzende Stromstärke ausreichend dick bemessenen Kupferlackdraht gewickelt ist. Zusätzlich können Kupferrohre mit in die Magnetfeldspule 21 aufgenommen werden durch die Kühlwasser strömt, um Wärmeverluste aus der Magnetfeldspule 21 abzuführen.

Es ist alternativ auch möglich, die Magnetfeldspule 21 selbst aus einem dünnen, mit einem elektrisch isolierenden Material lackierten Kupferrohr zu wickeln, welches direkt von Kühlwasser durchströmt wird.

Durch die Magnetfeldspule 21 wird weiter über eine Stromversorgungseinheit 23 ein elektrischer Strom von beispielsweise 10 bis 100 Ampère geleitet.

Im erläuterten ersten Ausführungsbeispiel ist dies beispielsweise ein Gleichstrom, der im Inneren des Reaktors 15 ein statisches Magnetfeld erzeugt, das im Fall einer Magnet-

feldspule 21 mit 100 Windungen und einer Länge von 10 cm sowie einem Durchmesser von 40 cm beispielsweise eine magnetische Feldstärke im Zentrum der Magnetfeldspule 21 von etwa 0,3 mTesla/A Stromfluß erzeugt.

Um eine signifikante Steigerung der Plasmaerzeugungseffizienz und eine ausreichende magnetische Führung des induktiv gekoppelten Plasmas 14 zu gewährleisten, werden Magnetfeldstärken von 10 mT bis 100 mT, beispielsweise 30 mT, benötigt. Das bedeutet, die Stromversorgungseinheit 23 stellt zumindest während der Ätzschritte zur Ätzung eines Substrates 10 Stromstärken von etwa 30 bis 100 Ampère bereit.

Anstelle der Magnetfeldspule 21 kann im übrigen auch ein Permanentmagnet eingesetzt werden. Ein derartiger Permanentmagnet benötigt vorteilhaft keine Energie, hat jedoch den Nachteil, daß eine Einstellung der Magnetfeldstärke, die zur Einstellung eines optimalen Ätzprozesses von Vorteil ist, nicht möglich ist. Überdies ist die Feldstärke eines Permanentmagneten temperaturabhängig, so daß die Magnetfeldspule 21 bevorzugt wird.

In jedem Fall ist wichtig, daß die Richtung des über die Magnetfeldspule 21 oder den Permanentmagneten erzeugten Magnetfeldes zumindest näherungsweise oder überwiegend parallel zu der durch die Verbindungslinie von Substrat 10 und induktiv gekoppeltem Plasma 14 bzw. der Plasmaerregungszone definierten Richtung ist (longitudinale Magnetfeldorientierung).

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erläuterten Ausführungsbeispiels sieht im übrigen vor, daß zur Uniformitätsverbesserung des Ätzprozesses eine aus der DE 197 34 278 bekannte Apertur im Inneren des Reaktors 15 konzentrisch zur Reaktorwand zwischen der ICP-Quelle 13 bzw. der Plasmaerregungszone und dem Substrat 10 angebracht wird. Diese Apertur ist in Fig. 1 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Bevorzugt ist sie ca. 5 cm oberhalb der Substratelektrode 11 oder des Substrates 10 an dem Distanzstück 22 ("Spacer") befestigt.

Zudem muß im Falle der Verwendung einer Magnetfeldspule 21 in die Stromversorgungseinheit 23 eine geeignete, an sich bekannte Überwachungsvorrichtung integriert sein, die in die Prozeßablaufsteuerung eingebunden ist und eine Überwachung der Spulentemperatur und eine Notabschaltung beispielsweise bei Kühlwasserausfall vornimmt.

Der ICP-Spulengenerator 17 koppelt weiter während der Ätzschritte und/oder während der Passivierschritte eine gepulste Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma 14 ein, die im zeitlichen Mittel zwischen minimal 300 Watt bis maximal 5000 Watt liegt. Bevorzugt werden während der Ätzschritte im zeitlichen Mittel 2000 Watt und während der Passivierschritte 500 Watt eingekoppelt.

Um das Pulsen der eingekoppelten Plasmaleistung zu ermöglichen ist weiter vorgesehen, daß während des Pulsens ständig eine Anpassung der Impedanz der über den ICP-Spulengenerator 17 erzeugten Hochfrequenzleistung an die sich mit verändernder d. h. gepulster Plasmaleistung verändernde Plasmaimpedanz vorgenommen wird. Dazu wird die Frequenz des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes, das der ICP-Spulengenerator 17 erzeugt, zur Impedanzanpassung innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite variiert.

Im einzelnen ist dazu das bevorzugt symmetrisch aufgebaute und die ICP-Quelle 13 symmetrisch speisende Anpaßnetzwerk in dem zweiten Impedanztransformator 18 zunächst so eingestellt, daß eine möglichst optimale Impedanzanpassung stets dann gegeben ist, wenn die eingekoppelten Hochfrequenzplasmaleistungspulse ihre Maximalwerte erreicht haben. Typische Maximalwerte der Hochfrequenzplasmaleistungspulse liegen dabei zwischen 3 kWatt und

20 kWatt bei einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1 : 1 bis 1 : 10.

Weiterhin ist vorgesehen, daß die Frequenzvariation des eingekoppelten elektromagnetischen Wechselfeldes derart erfolgt, daß mit dem Erreichen der Maximalwerte der Hochfrequenzplasmaleistungspulse gleichzeitig die Stationär- oder Resonanzfrequenz 1" des von dem ICP-Spulengenerator 17 erzeugten hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes erreicht ist. Die Stationärfrequenz 1" beträgt dabei bevorzugt 13,56 MHz.

Die Variation der Frequenz des elektromagnetischen Wechselfeldes um die Stationärfrequenz 1" beim Pulsen der Plasmaleistung wird vorgenommen, um zu gewährleisten, daß beim Pulsen der Plasmaleistung stets eine zumindest weitgehende Anpassung der Impedanz der erzeugten Hochfrequenzleistung bzw. des ICP-Spulengenerators 17 an die jeweilige, sich zeitlich als Funktion der Plasmaleistung ändernde Impedanz des Plasmas 14 gegeben ist. Dazu wird die Frequenz des ICP-Spulengenerators 17 innerhalb einer gewissen Bandbreite um die Stationärfrequenz 1" freigegeben und durch eine Regelelektronik zur Impedanzanpassung innerhalb dieser Bandbreite variiert.

Diese Frequenzvariation wird mit Hilfe der Fig. 3 erläutert, in der eine Filterkennlinie 1' dargestellt ist, die einen voreingestellten Frequenzbereich (Bandbreite) vorgibt, innerhalb dessen die Frequenz des ICP-Spulengenerators 17 variiert wird, wobei jeder Frequenz eine gewisse Hochfrequenzleistung bzw. einzukoppelnde Plasmaleistung oder eine Dämpfung A der Leistung des ICP-Spulengenerators 17 zugeordnet ist. Die zu erreichende Frequenz im stationären Leistungsfall ist dabei die Stationärfrequenz 1", die zumindest näherungsweise jeweils dann vorliegt, wenn während eines Plasmaleistungspulses die jeweilige Maximalleistung des Pulses erreicht ist.

Weitere Details einer geeigneten elektronischen Schaltung zur Impedanzanpassung durch Frequenzvariation in Form eines selbsttätig wirkenden Rückkopplungskreises werden mit Hilfe der Fig. 2 erläutert. Dabei wird zunächst die ICP-Quelle 13, d. h. konkret deren Spule, zunächst in an sich aus DE 199 00 179 bekannter Weise durch ein vorzugsweise balanciertes symmetrisches Anpaßnetzwerk 2 aus einem unbalancierten unsymmetrischen Ausgang des ICP-Spulengenerators 17 gespeist. Das Anpaßnetzwerk 2 ist dabei Teil des zweiten Impedanztransformators 18. Der ICP-Spulengenerator 17 weist weiter einen Hochfrequenz-Leistungsverstärker 3 und einen Quarzoszillator 4 zur Erzeugung einer hochfrequenten Grundschiwingung mit fester Frequenz von beispielsweise 13,56 MHz auf.

Die hochfrequente Grundschiwingung des Quarzoszillators 4 wird im Stand der Technik normalerweise in den Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 eingespeist. Diese Einspeisung jedoch zunächst dahingehend modifiziert, daß der Quarzoszillator 4 vom Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 zumindest während der Leistungsänderungsphasen getrennt und dessen Eingang extern, beispielsweise über eine entsprechende Eingangsbuchse, zugänglich gemacht wird. Da der Quarzoszillator 4 in dieser Ausführungsform keine Funktion mehr besitzt, kann er auch geeignet deaktiviert werden.

Es ist im übrigen auch möglich, den Quarzoszillator 4 im stationären Fall, d. h. nach Abschluß einer Leistungsvariation, wieder auf den Verstärkereingang zu schalten und den externen Rückkopplungskreis zu trennen. Damit erfolgt ein elektrisch sehr schnell mögliches Umschalten zwischen internem Oszillator und externem Rückkopplungskreis, je nachdem ob die Generatorausgangsleistung gerade stationär oder in Veränderung begriffen ist.

Der Leistungsverstärker 3 besitzt weiter in bekannter

Weise Generatorsteuereingänge 9, die zur externen Steuerung des ICP-Spulengenerators 17 dienen. Darüber ist beispielsweise ein Ein- und Ausschalten des ICP-Spulengenerators 17 oder die Vorgabe einer zu erzeugenden Hochfrequenzleistung zur Einkopplung in das Plasma 14 möglich. Außerdem sind Generatorstatusausgänge 9' zur Rückmeldung von Generatordaten, wie beispielsweise Generatorstatus, gegenwärtige Ausgangsleistung, reflektierte Leistung, Überlast usw., an ein nicht dargestelltes externes Steuergerät 10 (Maschinensteuerung) oder die Stromversorgungseinheit 23 der Plasmaätzanlage 5 vorgesehen.

Der Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 wird nun im Sinne einer Rückkopplungsschaltung zumindest zeitweise, d. h. während Leistungsänderungsphasen, über ein frequenzselektives Bauteil 1 mit der ICP-Quelle 13 verbunden. Dabei können zusätzlich Kondensatoren, Induktivitäten und Widerstände oder Kombinationen aus denselben in an sich bekannter Weise als Spannungsteiler verschaltet und vorgesehen sein, um die hohen Spannungen, die an der Spule der ICP-Quelle 13 auftreten, auf ein als Eingangsgröße für das frequenzselektive Bauteil 1 bzw. den Verstärkereingang des Leistungsverstärkers 3 geeignetes Maß abzuschwächen. Solche Spannungsteiler sind Stand der Technik und sind in der Fig. 2 lediglich durch einen Auskoppelkondensator 24 zwischen der Spule der ICP-Quelle 13 d. h. einem Signalabgriff 25 und dem frequenzselektivem Bauteil 1 angedeutet. Man kann übrigens den Signalabgriff 25 alternativ auch in die Nähe des eingezeichneten geerdeten Mittelpunkts oder Mittelabgriffes 26 der Spule der ICP-Quelle 13 verlegen, wo entsprechend geringere Spannungspegel herrschen. Je nach Abstand des Signalabgriffs 25, der beispielsweise als verstellbarer Klemmkontakt ausgeführt sein kann, vom geerdeten Mittelabgriff 26 der Spule der ICP-Quelle 13 kann eine größere oder kleinere abgegriffene Spannung eingestellt und somit günstige Pegelverhältnisse erreicht werden.

Das frequenzselektive Bauteil 1 ist exemplarisch als abstimmbare Anordnung von Spulen und Kondensatoren, sogenannten LC-Resonanzkreisen dargestellt, welche zusammen ein Bandfilter bilden. Dieses Bandfilter hat als Durchlaßbereich eine gewisse vorgegebene Bandbreite von beispielsweise 0,1 MHz bis 4 MHz und eine Filterkennlinie 1', wie sie schematisch in Fig. 3 dargestellt ist.

Insbesondere weist das Bandfilter eine Resonanz- oder Stationärfrequenz 1" mit maximaler Signaltransmission auf. Diese Stationärfrequenz 1" beträgt im erläuterten Beispiel 13,56 MHz und kann insbesondere durch einen Schwingquarz 6 oder ein Piezokeramikfilterelement als zusätzlicher Komponente des Bandfilters exakt festgelegt werden. Es ist im übrigen auch möglich, anstelle von LC-Resonanzkreisen sogenannte piezokeramische Filterelemente oder andere, an sich bekannte frequenzselektive Bauelemente zu einem Bandfilter mit einer gewünschten Filterkennlinie, Bandbreite und Stationärfrequenz 1" zu kombinieren.

Die vorstehend beschriebene Anordnung aus regeltem Leistungsverstärker 3, Anpaßnetzwerk 2, ICP-Quelle 13 und Bandfilter stellt insgesamt eine Rückkopplungsschaltung nach Art eines Meißner'schen Oszillators dar. Dieser schwingt bei Betrieb zunächst in der Nähe der Stationärfrequenz 1" an, um sich auf eine vorgegebene Ausgangsleistung des Leistungsverstärkers 3 aufzuschaukeln. Die für das Anschwingen erforderliche Phasenbeziehung zwischen Generatorausgang und Signalabgriff 25 wird dazu vorher einmalig, beispielsweise über eine Verzögerungsleitung 7 definierter Länge und damit über eine durch die Signallaufzeit definierte Phasenverschiebung oder einen an sich bekannten Phasenschieber anstelle der Verzögerungsleitung 7, eingestellt. Damit ist stets gewährleistet, daß die Spule der

ICP-Quelle 13 mit einer korrekten Phase optimal entdämpft wird.

Über die Verzögerungsleitung 7 wird weiter sichergestellt, daß am Ort der ICP-Quelle 13 die antreibende elektrische Spannung und der Strom in der Spule der ICP-Quelle 13 eine Resonanzphase von ungefähr 90° zueinander aufweisen.

In der Praxis ist im übrigen die Resonanzbedingung der Rückkopplungsschaltung über das frequenzselektive Bauteil 1 nicht scharf, so daß vielfach eine geringe Frequenzverschiebung in der Umgebung der Resonanz- oder Stationärfrequenz 1" ausreicht, um die Resonanzbedingung hinsichtlich der Phase quasi selbsttätig richtigzustellen. Daher ist es ausreichend, die Resonanzbedingung durch die äußere Beschaltung nur ungefähr richtigzustellen, damit der Resonanzkreis irgendwo in der unmittelbaren Umgebung seiner Stationärfrequenz 1" aufschwingt.

Sollten sich jedoch alle Phasenverschiebungen vom Signalabgriff 25 der Spule der ICP-Quelle 13 über das Bandfilter in den Eingang des Leistungsverstärkers 3 und durch den Leistungsverstärker zum zweiten Impedanztransformator 18 zurück in die Spule der ICP-Quelle 13 so ungünstig aufsummieren, daß gerade eine Bedämpfung statt einer Entdämpfung des Resonanzkreises stattfindet, so kann das System nicht anschwingen. Die Rückkopplung wird dann zu einer unerwünschten Gegenkopplung anstelle der gewünschten Mitkopplung. Die Einstellung dieser zumindest näherungsweise korrekten Phase leistet die Verzögerungsleitung 7, deren Länge daher einmalig für die Plasmaätzanlage 5 so einzustellen ist, daß die Rückkopplung konstruktiv, also entdämpfend wirkt.

Insgesamt kann im Fall einer Fehlanpassung an die Plasmaimpedanz, beispielsweise während schneller Leistungsänderungen, der erläuterte Rückkopplungskreis innerhalb des Durchlaßbereiches des Bandfilters in seiner Frequenz ausweichen und somit stets eine weitgehend optimale Impedanzanpassung auch bei schnellen Impedanzänderungen des induktiv gekoppelten Plasmas 14 aufrechterhalten. Während solcher schneller Leistungsänderungen ist der erläuterte Rückkopplungskreis stets aktiviert und der interne Oszillator 4 des Generators 17 deaktiviert.

Sobald sich das induktiv gekoppelte Plasma 14 dann hinsichtlich der Plasmaimpedanz bzw. der eingekoppelten Plasmaleistung stabilisiert, wird die Frequenz des ICP-Spulengenerators 17 in die Nähe oder auf den Wert der maximalen Durchlaßfrequenz zurückkehren, die durch die Stationärfrequenz 1" gegeben ist. Diese Anpassung der Impedanz durch Frequenzvariation geschieht selbsttätig und sehr schnell innerhalb weniger Schwingungsperioden der hochfrequenten, vom ICP-Spulengenerator erzeugten Wechselspannung d. h. im Mikrosekundenbereich.

Die Verbindung zwischen dem Ausgang des Leistungsverstärkers 3 und dem Eingang des zweiten Impedanztransformators 18 leistet im übrigen die Leitung 8, die als Koaxialkabel ausgebildet und in der Lage ist, eine Leistung von einigen kWatt zu tragen.

Um nun eine gepulste Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma einzukoppeln wird die Ausgangsleistung des ICP-Spulengenerators 17 beispielsweise periodisch mit einer Wiederholfrequenz von typischerweise 10 Hz bis 1 MHz, bevorzugt 10 kHz bis 100 kHz ein- und ausgeschaltet d. h. gepulst.

Alternativ kann auch die Hüllkurve der Ausgangsspannung des ICP-Spulengenerators 17 mit einer geeigneten Modulationsspannung in ihrer Amplitude moduliert werden. Derartige Vorrichtungen zur Amplitudenmodulation sind aus der Hochfrequenztechnik hinlänglich bekannt. Dazu wird beispielsweise der Generatorsteuereingang 9 zur Soll-

wertvorgabe der Hochfrequenzleistung des ICP-Spulengenerators 17 verwendet, um damit das die Hochfrequenzleistung des ICP-Spulengenerators 17 modulierende Signal einzuspeisen.

- 5 Selbstverständlich müssen der ICP-Spulengenerator 17 und die übrigen betroffenen Komponenten der Plasmaätzanlage 5 beim Pulsen der Plasmaleistung so ausgelegt werden, daß sie auch die auftretenden Spitzenbelastungen (Strom- und Spannungsspitzen) ohne Schaden verarbeiten können. 10 Aufgrund der hohen Spannungsspitzen an der induktiven Spule wirkt sich hierbei die balancierte Speisung der ICP-Quelle 13 besonders vorteilhaft auf den Erhalt günstiger Plasmaeigenschaften aus.

Typische Puls-zu-Pause-Verhältnisse, d. h. das Verhältnis der Zeitdauer der Pulse zu der Zeitdauer der Pausen, bei dem erläuterten Plasmaätzprozeß mit gepulster Plasmaleistung liegen im übrigen zwischen 1 : 1 und 1 : 100. Die Amplitude der einzelnen Hochfrequenzleistungspulse zur Erzeugung der Plasmaleistungspulse liegt zweckmäßig zwischen 500 Watt und 20.000 Watt, bevorzugt bei ca. 10.000 Watt, wobei die Einstellung der mittleren Plasmaleistung beispielsweise durch eine Einstellung des Puls-zu-Pause-Verhältnisses vorgenommen wird.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel sieht in Weiterführung des vorstehend erläuterten Ausführungsbeispiels vor, daß das über die Magnetfeldspule 21 erzeugte Magnetfeld nunmehr ebenfalls gepulst wird. Dabei sei jedoch betont, daß der Einsatz eines konstanten oder gepulsten Magnetfeldes zwar vorteilhaft für das erfindungsgemäße Verfahren zur Plasmaätzung mit Plasmaleistungspulsen, jedoch nicht zwingend ist. Je nach Einzelfall kann auf ein zusätzliches Magnetfeld auch verzichtet werden.

Besonders bevorzugt erfolgt die Pulsung des Magnetfeldes, die in einfacher Weise über entsprechende von der Stromversorgungseinheit 23 erzeugte Strompulse hervorgerufen wird, derart, daß das Magnetfeld nur dann erzeugt wird, wenn gleichzeitig auch ein Hochfrequenzleistungspuls zur Erzeugung bzw. Einkopplung von Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma 14 an der ICP-Quelle 13 ansteht. Solange keine Plasmaleistung eingekoppelt oder kein Plasma angeregt wird, ist in der Regel auch keine Magnetfeldunterstützung erforderlich.

Eine derartige zeitliche Synchronisation von Hochfrequenzleistungspulsen zur Einkopplung von Plasmaleistung in das Plasma 14 und Strompulsen durch die Magnetfeldspule 21 wird mit Hilfe der Fig. 4 erläutert. Dabei wird der Spulenstrom durch die Magnetfeldspule 21 jeweils kurz vor einem Hochfrequenzleistungspuls eingeschaltet und kurz nach dem Ende dieses Pulses wieder ausgeschaltet. Die zeitliche Synchronisation der Strom- bzw. Plasmaleistungspulse kann dabei in einfacher Weise durch einen beispielsweise in die Stromversorgungseinheit 23 integrierten, an sich bekannten Pulsgeber gewährleistet werden, der mit zusätzlichen Zeitgliedern versehen ist, um den Plasmaleistungspuls mit einer gewissen Verzögerung von beispielsweise 10% der eingestellten Hochfrequenzimpulsdauer nach dem Einschalten des Stroms der Magnetfeldspule 21 aufzuschalten bzw. diesen Strom mit einer gewissen Verzögerung von beispielsweise 10% der eingestellten Hochfrequenzimpulsdauer nach dem Ende des Plasmaleistungspulses wieder auszuschalten. Dazu ist weiter auch eine Verbindung von Stromversorgungseinheit 23 und ICP-Spulengenerator 17 vorgesehen. Solche Synchronisationsschaltungen und entsprechende Zeitglieder zur Herstellung der benötigten Zeitverzögerungen sind Stand der Technik und allgemein bekannt. Dazu ist die Stromversorgungseinheit 23 weiter mit dem ICP-Spulengenerator 17 in Verbindung. Im übrigen sei betont, daß die Dauer eines Strompulses durch die Magnet-

feldspule 21 vorteilhaft stets etwas länger als die Dauer eines Plasmaleistungspulses ist.

Typische Wiederholraten oder Pulsraten orientieren sich an der Induktivität der Magnetfeldspule 21, die die Änderungsgeschwindigkeit des Spulenstroms begrenzt. Eine Wiederholrate von einigen 10 Hz bis 10 kHz ist, abhängig von deren Geometrie, für die meisten Magnetfeldspulen 21 realistisch. Typische Puls-zu-Pause-Verhältnisse für die Plasmaleistungspulse liegen zwischen 1 : 1 und 1 : 100.

In diesem Zusammenhang ist weiter vorgesehen, die aus DE 197 34 278.7 bekannte und bereits vorstehend erläuterte Apertur unterhalb der Magnetfeldspule 21 einige cm über dem Substrat 10 oder der Substratelektrode 11, die das Substrat 10 trägt, einzusetzen. Durch diese Apertur verbessert sich einerseits die Uniformität der Ätzung über die Substratoberfläche insbesondere mit einer symmetrisch gespeisten ICP-Quelle 13 deutlich. Gleichzeitig reduziert sie auch das zeitvariable Magnetfeld – die Transienten – am Ort des Substrates 10. Dabei führen Wirbelströme in dem Aperturring der Apertur zu einer Bedämpfung der zeitvariablen Magnetfeldanteile unmittelbar vor dem Substrat 10, so daß Induktionsvorgänge auf dem Substrat 10 selbst abgeschwächt werden.

Derartige sich ändernde Magnetfelder, sogenannte Transienten, könnten an Antennenstrukturen auf dem Substrat 10 Spannungen induzieren, die ihrerseits wieder zu Schädigungen des Substrates 10 führen können, wenn dieses beispielsweise integrierte Schaltkreise oder insbesondere Feldeffekttransistoren aufweist.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel sieht in Weiterführung der vorstehenden Ausführungsbeispiele vor, daß neben der Pulsung der Plasmaleistung über den ICP-Spulengenerator, gegebenenfalls wie vorstehend erläutert unter gleichzeitigem Einsatz eines zeitlich konstanten oder gepulsten Magnetfeldes, nun auch die über die Substratelektrode 11 an dem Substrat 10 anliegende, von dem Substratspannungsgenerator 12 erzeugte Hochfrequenzleistung gepulst wird, und daß diese Pulsungen von Plasmaleistung und Substratspannung oder von Plasmaleistung, Substratspannung und Magnetfeld insbesondere miteinander synchronisiert werden.

Im einzelnen erfolgt die Pulsung der in die Substratelektrode 11 eingekoppelten gepulsten Hochfrequenzleistung bevorzugt derart, daß über den Substratspannungsgenerator 12 nur während der Dauer der über den ICP-Spulengenerator 17 erzeugten Plasmaleistungspulse eine Hochfrequenzleistung in das Substrat 10 eingekoppelt wird. Dazu werden beispielsweise ein oder mehrere Hochfrequenzleistungspulse mit dem Substratspannungsgenerator 12 während eines Plasmaleistungspulses, also bei maximaler Plasmadichte an positiv geladenen Ionen und Elektronen, eingesetzt.

Alternativ kann die Pulsung der in die Substratelektrode 11 eingekoppelten Hochfrequenzleistung jedoch auch derart erfolgen, daß ein oder mehrere Substratspannungsgeneratorpulse nur während der Impulspausen der Plasmaleistungspulse angelegt werden. In diesem Fall wird die über den Substratspannungsgenerator eingekoppelte Hochfrequenzleistung gerade dann eingekoppelt, wenn die Plasmaerzeugung nicht aktiv ist, also bei minimaler Dichte an positiv geladenen Ionen und Elektronen, aber maximaler Dichte an negativ geladenen Ionen, sogenannten Anionen, welche aus der Rekombination von Elektronen und Neutralteilchen in den Anregungspausen im zusammenbrechenden Plasma entstehen. Diese Zeitphasen eines gerade abgeschalteten Plasmas, das sogenannte "afterglow regime", d. h. die "Nachleuchtphase" des gerade abgeschalteten Plasmas, werden durch Rekombinationsprozesse von Elektronen und positiv geladenen Ionen oder Neutralteilchen dominiert. Wenn

in dieser Nachleuchtphase die Substratelektrodenleistung in Form von einem oder mehreren Pulsen aktiviert wird, führt dies auf dem zu bearbeitenden Substrat 10 bei gewissen Anwendungen, wie beispielsweise im Fall eines Ätzstoppes auf einem vergrabenen Dielektrikum wie SiO_2 bei gleichzeitig hohen Aspektverhältnissen der erzeugten Trenchgräben, zu wünschenswerten Wafereffekten, die insbesondere, durch das vermehrte Einwirken von negativ geladenen Ionen hervorgerufen werden, die ansonsten bei Plasmaätzprozessen praktisch keine Rolle spielen. Eine in diesem Zusammenhang besonders vorteilhafte, spezielle Ausführung dieser zeitlichen Korrelation von Plasmaleistungspulsen und in die Substratelektrode 11 eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulsen ist dadurch gegeben, daß die Plasmaerzeugung im wesentlichen im Dauerstrich stattfindet und jeweils nur kurzzeitig abgeschaltet wird, um innerhalb dieser kurzen Abschaltphasen des ICP-Spulengenerators 17 einen Hochfrequenzleistungspuls über den Substratspannungsgenerator 12 in das Substrat 10 einzukoppeln. Insgesamt unterbricht man damit periodisch kurzzeitig mit der Wiederholfrequenz des Erscheinens der Substratspannungsgeneratorpulse den ICP-Spulengenerator 17 für eine Zeitdauer, die länger, insbesondere geringfügig länger als die Pulsdauer des Substratspannungsgeneratorpulses ist. Das Puls-zu-Pause-Verhältnis des ICP-Spulengenerators 17 beträgt in diesem Fall typischerweise 1 : 1 bis 20 : 1.

Je nach konkretem Ätzprozeß bestehen eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten der zeitlichen Synchronisation oder Korrelation von über den Substratspannungsgenerator 12 in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulsen und in das induktiv gekoppelte Plasma 14 eingekoppelten Plasmaleistungspulsen. So können die Substratspannungsgeneratorpulse sowohl während der Plasmaleistungspulse als auch während der Plasmaleistungspausen eingekoppelt werden d. h. es wird beispielsweise während eines Plasmaleistungspulses jeweils ein Substratspannungsgeneratorpuls und während einer Plasmaleistungspause jeweils ein weiterer Substratspannungsgeneratorpuls gesetzt. Die Verhältnisse der Pulsanzahlen des Substratspannungsgenerators 12 in den Phasen "Plasma an" und "Plasma aus" können dabei im Einzelfall weitgehend frei gewählt werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Substratspannungsgeneratorpulse nur während abfallender und/oder ansteigender Impulsflanken der Plasmaleistungspulse einzusetzen d. h. bei beginnender "Afterglow-Phase" oder beim Hochlaufen der Plasmaerzeugung. Die jeweils optimale zeitliche Korrelation von Plasmaleistungspulsen und Substratspannungsgeneratorpulsen muß dabei vom Fachmann im Einzelfall für den jeweiligen Ätzprozeß oder das jeweils geätzte Substrat anhand von einfachen Testätzungen ermittelt werden.

Ganz besonders bevorzugt erfolgt die zeitliche Synchronisation oder Korrelation der über den Substratspannungsgenerator 17 in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulse mit den Plasmaleistungspulsen derart, daß die Pulsdauer der Hochfrequenzleistungspulse so kurz eingestellt wird, daß ein Einzelpuls jeweils nur wenige Schwingungsperioden, insbesondere weniger als 10 Schwingungsperioden, der hochfrequenten Grundschiwingung der im Substratspannungsgenerator erzeugten hochfrequenten Wechselspannung andauert.

Im einzelnen wird dazu beispielsweise eine Frequenz von 13,56 MHz für die Grundschiwingung der in das Substrat einzukoppelnden Hochfrequenzleistungspulse benutzt, so daß die Dauer einer Schwingungsperiode der hochfrequenten Grundschiwingung ca. 74 ns beträgt. Im Fall von 10 Schwingungsperioden ergibt sich somit eine Pulsdauer der Substratspannungsgeneratorpulse von lediglich 740 ns. So-

mit wird bei einer Wiederholffrequenz der Einzelimpulse der Substratspannungsgeneratorpulse von beispielsweise 200 kHz, entsprechend einem Pulsabstand von 5000 ns, und einer Pulslänge von beispielsweise 500 ns, d. h. ungefähr 7 Schwingungsperioden der hochfrequenten Grundschiwingung von 13,56 MHz, ein Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1 : 9 eingestellt. Zur Erreichung einer im zeitlichen Mittel ca. 20 Watt großen, in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistung ist demnach eine Maximalleistung der Substratspannungsgeneratorpulse von 200 Watt erforderlich, die über entsprechend große Hochfrequenzamplituden erhalten wird.

Die Maximalleistung der einzelnen Substratspannungsgeneratorpulse kann jedoch auch weitaus geringer oder weitaus höher sein und beispielsweise bis zu 1200 Watt erreichen. Die im zeitlichen Mittel in das Substrat 10 eingekoppelte Hochfrequenzleistung beträgt im erläuterten Beispiel dann jeweils ein Zehntel des jeweiligen Maximalwertes der Einzelpulse.

Als Parameter zur Einstellung der im zeitlichen Mittel in das Substrat 10 eingekoppelten Hochfrequenzleistung steht somit neben der Wahl des Puls-zu-Pause-Verhältnisses auch der Maximalwert der Leistung eines einzelnen Substratspannungsgeneratorpulses zur Verfügung. Daher kann entweder die Maximalleistung während der Substratspannungsgeneratorpulse auf einen festen Wert von beispielsweise 1 kWatt festgelegt und das Puls-zu-Pause-Verhältnis so geregelt werden, daß ein voreingestellter zeitlicher Mittelwert der Hochfrequenzleistung in das Substrat 10 eingekoppelt wird, oder umgekehrt das Puls-zu-Pause-Verhältnis fest eingestellt werden und die Maximalleistung während der Substratspannungsgeneratorpulse entsprechend so geregelt werden, daß dieser zeitliche Leistungsmittelwert erreicht wird.

Zur Realisierung dieser Regelung wird beispielsweise eine Sollwertvorgabe der in das Substrat 10 einzukoppelnden Hochfrequenzleistung der Maschinensteuerung der Plasmaätzanlage 5 als analoge Spannungsgröße in eine Wiederholffrequenz von Einzelimpulsen umgesetzt, so daß die vom Substratspannungsgenerator 12 abgegebene, und an die Maschinensteuerung rückgemeldete Durchschnittsleistung als zeitlicher Mittelwert genau der Sollwertvorgabe entspricht. Zur Übersetzung einer analogen Spannungs Vorgabe in eine Frequenz werden dazu an sich bekannte, sogenannte U/f-Wandlerbausteine (Spannungs/Frequenzwandler) bzw. VCO's ("Voltage Controlled Oscillator") eingesetzt.

Die Erzeugung von Hochfrequenzpulsen im angegebenen Kurzzeitbereich mit dem Substratspannungsgenerator 12 ist an sich technisch relativ unproblematisch, da Hochfrequenzgeneratoren kommerziell erhältlich sind, die eine Anstiegs- und Abfallzeit von 30 ns aufweisen und Pulsdauer von 100 ns bei Spitzenleistungen bis hin zu mehreren Kilowatt bewältigen können.

Die erläuterten, in das Substrat 10 eingekoppelten und mit dem Substratspannungsgenerator 12 erzeugten Hochfrequenzleistungspulse im Bereich einiger hundert Nanosekunden werden im übrigen zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit bevorzugt derart erzeugt, daß das hochfrequente Signal innerhalb eines Einzelimpulses immer gleich aussieht. Dazu werden für einen Einzelimpuls beispielsweise immer drei volle hochfrequente Schwingungsperioden der 13,56 MHz Grundschiwingung so herausgeschnitten, daß der hochfrequente Signalverlauf zu Beginn jedes Einzelimpulses jeweils mit einem Nulldurchgang und einem ansteigenden Sinus beginnt und zum Ende des Einzelimpulses jeweils mit einem Nulldurchgang und ebenfalls einem ansteigenden Sinus endet.

Diese Synchronisation von Einzelimpulsverlauf und Ver-

lauf der hochfrequenten Grundschiwingung kann alternativ auch derart erfolgen, daß zu Beginn eines Einzelimpulses gerade eine positive Sinushalbwellen der hochfrequenten Grundschiwingung beginnt und zum Ende eines Einzelimpulses gerade eine positive Halbwellen endet, d. h. der Einzelimpuls umfaßt eine um 1 größere Zahl von positiven Sinushalbwellen als negative Sinushalbwellen. Umgekehrt kann durch entsprechende Synchronisation unter sonst gleichen Verhältnissen auch eine um 1 größere Zahl von negativen Sinushalbwellen als positiven Sinushalbwellen in einen Einzelimpuls gelegt werden, indem der Einzelimpuls mit einer negativen Sinushalbwellen des hochfrequenten Signals beginnt und endet.

Ohne die erläuterte Synchronisation könnte die Zahl positiver und negativer Sinushalbwellen in den erzeugten Hochfrequenzpulsen unterschiedlich ausfallen, wobei in Grenzfällen Unterschiede von bis zu zwei Sinushalbwellen möglich wären. Dies führte besonders bei einer nur geringen Anzahl von Schwingungsperioden innerhalb eines über den Substratspannungsgenerator 17 erzeugten Hochfrequenzpulses zu stochastischen Abweichungen der Signalverläufe der Einzelpulse und insbesondere zu langsam fluktuierenden Verhältnissen hinsichtlich der Anzahl der positiven und negativen Sinushalbwellen, was die Reproduzierbarkeit des gesamten Ätzprozesses negativ beeinflusst.

Um zu gewährleisten, daß immer der gleiche hochfrequente Spannungsverlauf innerhalb eines Einzelimpulses des Substratspannungsgenerators 12 vorliegt, wird daher zur Synchronisation der Einzelimpulse mit der hochfrequenten Grundschiwingung bevorzugt die mit Hilfe der Fig. 5 erläuterte elektronische Schaltung in diesem Ausführungsbeispiel zusätzlich mit dem Substratspannungsgenerator 12 integriert ausgeführt.

Im einzelnen sieht die Schaltung gemäß Fig. 5 zunächst eine Steuervorrichtung 32 mit einem integrierten Frequenzgenerator vor, der ein Rechtecksignal mit der Frequenz vorgibt, mit der die Einzelimpulse in das Substrat 10 eingekoppelt werden sollen, beispielsweise 200 kHz. Diese Wiederholffrequenz kann jedoch alternativ auch – bei fest gewählter Impulsspitzenleistung des Substratspannungsgenerators 12 – aus der Sollwertvorgabe einer Durchschnittsleistung der Anlagensteuerung der Plasmaätzanlage 5 so abgeleitet werden, daß die vom Substratspannungsgenerator 12 in Form von Einzelimpulsen abgegebene und an die Maschinensteuerung rückgemeldete Durchschnittsleistung der als Sollwert vorgegebenen Durchschnittsleistung entspricht, was beispielsweise durch eine einfache Spannungs-Frequenzwandlung mit entsprechender Kalibrierung erreicht wird.

Die Rechteckausgangsspannung des Frequenzgenerators der Steuervorrichtung 32 wird im weiteren dann zunächst in einer an sich bekannten U/f-Wandlernvorrichtung 34 in eine zugeordnete Frequenz gewandelt und gleichzeitig an den D-Eingang und den Clear-Eingang (CLR-Eingang) eines D-Flipflops 35 angelegt. Damit bleibt das D-Flipflop 35 solange gelöscht (0-Pegel an Clear) und kann auch nicht gesetzt werden (0-Pegel an D-Eingang), solange die Rechteckspannung einen 0-Pegel aufweist.

Am Takteingang des D-Flipflops 35 liegt weiter über einen einstellbaren Phasenschieber 30 eine unter Umständen geeignet aufbereitete Oszillatorspannung eines Hochfrequenzgenerators 31 an, der eine hochfrequente Wechselspannung von beispielsweise 13,56 MHz erzeugt. Dieser Ausgang wird bei kommerziell verfügbaren HF-Generatoren als CEX-Ausgang bezeichnet ("Common Exciter").

Sobald nun das Rechtecksignal des Frequenzgenerators von 0 auf 1 gewechselt hat, wird das D-Flipflop 35 jedesmal von der nächsten, darauffolgenden positiven Sinushalbwellen

der hochfrequenten Wechselspannung des HF-Generators 31 gesetzt und bleibt solange gesetzt, bis das Rechtecksignal des Frequenzgenerators wieder von 1 auf 0 zurückschaltet und über den Clear-Eingang das D-Flipflop 35 mittels 0-Pegel zurücksetzt.

Der Ausgang des D-Flipflops 35 ist weiter so mit dem Takteingang eines Monoflops 33 verbunden, daß das Monoflop 33 gleichzeitig mit dem Setzen des D-Flipflops 35 einen Einzelimpuls abgibt, dessen Impulsdauer über eine in das Monoflop 33 integrierte Widerstands-Kondensator-Kombination weitgehend frei, insbesondere sehr kurz d. h. kleiner als 100 ns gewählt werden kann. Dieser Einzelimpuls des Monoflops 33 wird dem Pulseingang des Hochfrequenzgenerators 31 zugeführt und veranlaßt diesen, während der Dauer des angelegten Einzelimpulses am Generatorausgang 36 einen hochfrequenten Ausgangsimpuls, d. h. ein aus wenigen hochfrequenten Schwingungsperioden bestehendes Spannungspaket abzugeben. Damit ist das Ausgangssignal am Generatorausgang 36 stets synchron zu der hochfrequenten Grundschiwingung des internen Hochfrequenzgenerators 31, so daß das Ausgangssignal des Substratspannungsgenerators 12 am Ausgang 36, d. h. die erzeugten und über das Substrat 10 eingekoppelten Substratspannungsgeneratorpulse stets gleich aussehen.

Die beschriebene Kombination aus D-Flipflop 35 und Monoflop 33 garantiert, daß pro Rechteckperiode des Frequenzgenerators nur ein einziger Einzelimpuls von vorgeählter Dauer erzeugt wird, der zur hochfrequenten Wechselspannung des Hochfrequenzgenerators 31 synchronisiert ist. Damit erzeugt der Substratspannungsgenerator 12 Ausgangsimpulse einstellbarer Dauer und stets gleichen Signalverlaufes, die zu der hochfrequenten Grundschiwingung des Hochfrequenzgenerators 31 synchronisiert sind.

Der Phasenschieber 30 zwischen CEX-Ausgang des Hochfrequenzgenerators 31 und dem Takteingang des D-Flipflops 34 erlaubt es, die Phasenlage der in jedem Einzelimpuls bzw. Ausgangsimpuls des Hochfrequenzgenerators 31 enthaltenen hochfrequenten Schwingungsperioden innerhalb der Pulsbreite zu variieren. Der Phasenschieber kann damit insbesondere so abgeglichen werden, daß die hochfrequenten Schwingungsperioden der Wechselspannung gerade mit dem Einsetzen des Ausgangsimpulses des Substratspannungsgenerators 12 beginnen und mit dem Abklingen dieses Ausgangsimpulses enden, so daß jeder Ausgangsimpuls gerade eine ganze Zahl von Schwingungsperioden bzw. Sinushalbwellen umfaßt. Im einfachsten Fall ist der Phasenschieber 30 ein Koaxialkabel von definierter Länge als Verzögerungsleitung.

Die in Fig. 5 beschriebene Schaltung ist im übrigen lediglich exemplarisch. An deren Stelle kommen weiter auch andere Vorrichtungen, beispielsweise ein Synchronsteiler, welcher die Frequenz des generatorinternen Oszillators dividiert und daraus Einzelimpulse und Pausen zwischen den Einzelimpulsen ableitet, in Frage.

Die vorteilhafte Wirkung der in den vorstehenden Ausführungsbeispielen eingesetzten, insbesondere sehr kurzen Hochfrequenzleistungspulse mit hoher Amplitude, die über den Substratspannungsgenerator 12 in das Substrat 10 eingekoppelt werden, beruht auf folgenden Mechanismen im Plasma 14:

An einer einem Plasma 14 ausgesetzten Substratelektrode 11, welche über den Substratspannungsgenerator 12 mit einer hochfrequenten Spannung oder Hochfrequenzleistung beaufschlagt wird, stellt sich bekanntermaßen eine negative Gleichspannung gegenüber dem Plasma 14 und gegenüber Erdoberpotential ein. Diese als "Biasspannung" oder "Self-bias" bezeichnete Gleichspannung resultiert aus der unterschiedlichen Beweglichkeit von Elektronen und positiven Ionen im

elektrischen Wechselfeld. Während die leichten Elektronen dem hochfrequenten Wechselfeld instantan folgen und während der positiven Halbwellen der Wechselspannung die Substratelektrode 11 sehr leicht erreichen können, ist dies für die wesentlich schwereren positiven Ionen während der negativen Halbwellen der Wechselspannung mit zunehmender Frequenz des elektrischen Wechselfelds immer weniger möglich. Infolgedessen kommt es zu einer negativen Aufladung der Substratelektrode 11 durch den Überschuß an eintreffenden Elektronen gegenüber den eintreffenden positiven Ionen, bis sich ein Sättigungswert der Aufladung einstellt und im Zeitmittel gleich viele Elektronen wie positiv geladene Ionen die Substratelektrode 11 erreichen. Diesem Sättigungswert der negativen Aufladung entspricht die Substratelektrodenpotentialspannung.

Die Fig. 6 zeigt zur Erläuterung dieses Effektes ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild für ein einem Plasma 14 ausgesetztes, mit einer Hochfrequenzleistung aus dem Substratspannungsgenerator 12 gespeistes Substratelektrodenoberflächenelement 37. Die Ankopplung zur Erde erfolgt dabei über das Plasma 14, das durch die Parallelschaltung von Widerstand R und Diode D symbolisiert wird. Die Diode D trägt dem Effekt der Selbstgleichrichtung durch die unterschiedliche Beweglichkeit von Elektronen und Ionen im Plasma 14 Rechnung, der Widerstand R der Energiedissipation ins Plasma 14 (Wirkwiderstand). Die Kapazität C (Blindwiderstand) ist im wesentlichen eine apparative Konstante des Aufbaus der Substratelektrode 11.

Bei einem Pulsbetrieb unter Einsatz von hochfrequenten Substratspannungsgeneratorpulsen baut sich demnach an der Substratelektrode 11 zu Anfang eines jeden Pulses eine Substratelektrodenpotentialspannung auf, die nach einer Anzahl hochfrequenter Schwingungsperioden einen Sättigungswert erreicht und dort bis zum Ende des Pulses verharrt. Nach dem Ende des hochfrequenten Schwingungspakets klingt diese Substratelektrodenpotentialspannung während der Impulspause durch Entladeprozesse dann wieder ab. Eine typische Anzahl von Schwingungsperioden, welche zum Erreichen einer stationären Substratelektrodenpotentialspannung benötigt wird, liegt bei einer Hochfrequenz von 13,56 MHz und einem hochdichten induktiv gekoppelten Plasma 14, das in Kontakt mit der Substratelektrode steht, bei etwa 20 bis 100 Schwingungsperioden.

Durch den Einsatz von sehr kurzen Einzelimpulsen, welche nur wenige Schwingungsperioden, vorzugsweise weniger als 10 Schwingungsperioden umfassen, ist demnach der Sättigungswert der Substratelektrodenpotentialspannung noch nicht erreicht und die Substratelektrodenpotentialspannung noch im Ansteigen begriffen. Dies wird in Fig. 7 erläutert, die zeigt, wie sich die Substratelektrodenpotentialspannung U_{bias} als Funktion der Zahl der Schwingungsperioden n der Grundschiwingung der in das Substrat 10 eingekoppelten hochfrequenten Wechselspannung (13,56 MHz) entwickelt.

Die letztlich erreichte Höhe der Lokalspannung im Sättigungsfall nach vielen Schwingungsperioden hängt dabei wesentlich ab vom Wirkwiderstand R (Energiedissipation ins Plasma) und der Kapazität C des Kondensator (Blindleistungsanteil) gemäß Fig. 6. Der Sättigungswert der Substratelektrodenpotentialspannung, der sich nach vielen Schwingungsperioden auf der Substratoberfläche einstellt, hängt somit in hohem Maße vom Plasmawiderstand R ab (siehe Fig. 6) d. h. von der Energiedissipation in das Plasma 14, welche jedoch in der Regel lateral über das Substrat 10 inhomogen ist.

Somit treten lokale Unterschiede hinsichtlich der Energiedissipation in das Plasma 14 beispielsweise zwischen Mitte und Rand eines Substrats 10 auf, was zu Spannungsgradienten zwischen verschiedenen Oberflächenbereichen

des Substrates 10 führt. Diese Spannungsgradienten werden weiter dadurch wesentlich verstärkt, daß die Oberfläche des Substrates 10 infolge vielfach verwendeter dielektrischer Maskierschichten (Photolack, SiO₂-Maske usw.) beim Ätzen zumindest bereichsweise elektrisch isolierend oder nur schwach leitend ist.

Insofern stellt die Substratoberfläche 10 aufgrund der erläuterten Effekte keine Äquipotentialfläche mehr dar, sondern auftretende Spannungsgradienten von Substratmitte zu Substratrand wirken gegenüber dem Plasma 14 als elektrische Linse, was schließlich zu einer Ablenkung der zum Substrat 10 beschleunigten Ionen aus der Vertikalen und damit zu Störung in den erzeugten Ätzprofilen führt.

Durch die eingesetzten, sehr kurzen Substratelektrodenleistungspulse wird daher eine erhebliche Homogenisierung der Substratelektrodenspannung über die Substratoberfläche unabhängig von örtlich möglicherweise verschiedenen Plasmawiderständen R erreicht. Dies wird in Fig. 7 durch den linearen Kurvenverlauf im Fall einer nur geringen Zahl von Schwingungsperioden n veranschaulicht. Insgesamt erreicht man durch die erläuterten Maßnahmen somit einen drastischen Abbau von Spannungsgradienten auf der Substratoberfläche, einen Wegfall der unerwünschten elektrischen Linsenwirkung und schließlich zu deutlich verminderten Profilschragen, beispielsweise in aus dem Substrat herausstrukturierten Trenchgräben.

Weiter ist durch relativ lange Impulspausen nach jedem relativ kurzen Einzelimpuls sichergestellt, daß eine zuvor erreichte negative Substratelektrodenspannung zumindest weitgehend wieder abgebaut wird. Jeder Substratelektrodenleistungspuls startet somit von einem gleichen, definierten, entladenen Ausgangszustand der Substratoberfläche.

Durch das beschriebene Pulsen der Substratelektrodenleistung wird im übrigen nur ein Bruchteil der Substratelektrodenspannung erreicht, die sich sonst, d. h. bei Erreichen des Sättigungswerts nach vielen Schwingungsperioden einstellen würde. Sollen daher hohe oder sehr hohe Substratelektrodenspannungen von im zeitlichen Mittel beispielsweise 20 Volt bis 100 Volt realisiert werden, muß mit entsprechend großen Hochfrequenzspitzenleistungen während der Einzelimpulse operiert werden.

Bezugszeichenliste

1 frequenzselektives Bauteil	45
1' Filterkennlinie	
1" Stationärfrequenz	
2 Anpaßnetzwerk	
3 Leistungsverstärker	
4 Quarzoszillator	50
5 Plasmaätzanlage	
6 Schwingquarz	
7 Verzögerungsleitung	
8 Leitung	
9 Generatorsteuereingang	55
9' Generatorstatusausgang	
10 Substrat	
11 Substratelektrode	
12 Substratspannungsgenerator	
13 ICP-Quelle	60
14 induktiv gekoppeltes Plasma	
15 Reaktor	
16 erster Impedanztransformator	
17 ICP-Spulengenerator	
18 zweiter Impedanztransformator	65
19 Gaszufuhr	
20 Gasabfuhr	
21 Magnetfeldspule	

22 Distanzstück	
23 Stromversorgungseinheit	
24 Auskoppelkondensator	
25 Signalabgriff	
26 Mittelabgriff	
30 Phasenschieber	
31 Hochfrequenzgenerator	
32 Steuervorrichtung	
33 Monoflop	
34 U/f-Wandlervorrichtung	
35 D-Flipflop	
36 Generatorausgang	
37 Substratelektrodenoberfläche	

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines Siliziumkörpers, mittels eines induktiv gekoppelten Plasmas (14), mit einer ICP-Quelle (13) zum Generieren eines hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes und einem Reaktor (15) zum Erzeugen des induktiv gekoppelten Plasmas (14) aus reaktiven Teilchen durch Einwirken des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes auf ein Reaktivgas, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein erstes Mittel vorgesehen ist, mit dem mit der ICP-Quelle (13) in das induktiv gekoppelte Plasma (14) einzukoppelnde Plasmaleistungspulse erzeugbar sind.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Mittel ein ICP-Spulengenerator (17) ist, der eine hinsichtlich des Puls-zu-Pause-Verhältnisses der Plasmaleistungspulse und/oder der Einzelpulsleistung variabel einstellbare, gepulste Hochfrequenzleistung erzeugt.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur Anpassung einer Ausgangsimpedanz des ICP-Spulengenerators (17) an eine von der Einzelpulsleistung der einzukoppelnden Plasmaleistungspulse abhängige Plasmaimpedanz ein Impedanztransformator (18) in Form eines insbesondere balancierten symmetrischen Anpaßnetzwerkes vorgesehen ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Impedanztransformator (18) derart voreingestellt ist, daß bei einer vorgegebenen maximalen Einzelpulsleistung der in das induktiv gekoppelte Plasma (14) einzukoppelnden Plasmaleistungspulse im stationären Leistungsfall eine zumindest weitgehend optimale Impedanzanpassung gewährleistet ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß in den ICP-Spulengenerator (17) Bauteile integriert sind, die über eine Variation der Frequenz des erzeugten elektromagnetischen Wechselfeldes eine Impedanzanpassung als Funktion der einzukoppelnden Einzelpulsleistung vornehmen.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der ICP-Spulengenerator (17) mit einem selbsttätig wirkenden Rückkopplungsschaltkreis mit einem frequenzselektiven Bauteil (1) versehen ist, wobei der Rückkopplungsschaltkreis mindestens einen geregelten Leistungsverstärker, ein frequenzselektives Bandfilter mit einer zu erreichenden Stationärfrequenz (1") und eine Verzögerungsleitung (7) oder einem Phasenschieber aufweist.
7. Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein zweites Mittel vorgesehen ist, das zwischen dem Substrat (10) und der ICP-Quelle (13) ein statisches oder zeitlich variierendes, insbesondere gepulstes Magnet-

feld erzeugt.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Mittel eine Magnetfeldspule (21) mit zugehöriger Stromversorgungseinheit (23) oder ein Permanentmagnet ist, wobei das von der Magnetfeldspule (21) erzeugte Magnetfeld mittels der Stromversorgungseinheit (23) zeitlich variierbar, insbesondere pulsbar ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Substratspannungsgenerator (12) vorgesehen ist, mit dem das Substrat (10), insbesondere das auf einer Substratelektrode (11) angeordnete Substrat (10), mit einer kontinuierlichen oder zeitlich variierenden, insbesondere gepulsten Hochfrequenzleistung beaufschlagbar ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß zur Impedanzanpassung zwischen dem Substratspannungsgenerator (12) und dem Substrat (10) ein erster Impedanztransformator (12) vorgesehen ist.

11. Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der ICP-Spulengenerator (17) mit dem Substratspannungsgenerator (12) und/oder der Stromversorgungseinheit (23) in Verbindung steht.

12. Verfahren nach Ätzen eines Substrates (10), insbesondere eines Siliziumkörpers, mit einer Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest zeitweise eine gepulste Hochfrequenzleistung als gepulste Plasmaleistung in das induktiv gekoppelte Plasma (14) eingekoppelt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die gepulste Plasmaleistung über eine ICP-Quelle (13) eingekoppelt wird, die mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld mit einer konstanten Frequenz oder mit einer innerhalb eines Frequenzbereiches um eine Stationärfrequenz (1") variierenden Frequenz beaufschlagt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die gepulste Hochfrequenzleistung mit einem ICP-Spulengenerator (17) erzeugt wird, der mit einer Frequenz von 10 Hz bis 1 MHz und einem Puls-zu-Pause-Verhältnis von 1 : 1 bis 1 : 100 gepulst betrieben wird.

15. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß im zeitlichen Mittel eine Plasmaleistung von 300 Watt bis 5000 Watt in das induktiv gekoppelte Plasma (14) eingekoppelt wird, und daß die erzeugten Einzelpulsleistungen der Hochfrequenzleistungspulse zwischen 300 Watt und 20 kWatt, insbesondere 2 kWatt bis 10 kWatt, betragen.

16. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Pulsen der eingekoppelten Hochfrequenzleistung von einer Veränderung der Frequenz der eingekoppelten Hochfrequenzleistung begleitet wird, wobei die Frequenzveränderung so gesteuert wird, daß die während des Pulsens in das induktiv gekoppelte Plasma (14) eingekoppelte Plasmaleistung maximiert wird.

17. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 12 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Ätzen ein statisches oder zeitlich variierendes, insbesondere periodisch variierendes oder gepulstes Magnetfeld erzeugt wird, dessen Richtung zumindest näherungsweise oder überwiegend parallel zu einer durch die Verbindungslinie von Substrat (10) und induktiv gekoppeltem Plasma (14) definierten Richtung ist.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß das Magnetfeld derart erzeugt wird, daß es sich in den Bereich des Substrates (10) und des induktiv gekoppelten Plasmas (14) erstreckt und im Inneren des Reaktors (15) eine Amplitude der Feldstärke zwischen 10 mTesla und 100 mTesla aufweist.

19. Verfahren nach Anspruch 17 oder 18, dadurch gekennzeichnet, daß über die Stromversorgungseinheit (23) ein mit einer Frequenz von 10 Hz bis 20 kHz gepulstes Magnetfeld erzeugt wird, wobei das Puls-zu-Pause-Verhältnis beim Pulsen des Magnetfeldes zwischen 1 : 1 und 1 : 100 liegt.

20. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (10) über einen Substratspannungsgenerator (12) mit einer konstanten oder zeitlich variierbaren, insbesondere gepulsten Hochfrequenzleistung beaufschlagt wird.

21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß die Pulsdauer der in das Substrat eingekoppelten Hochfrequenzleistung zwischen dem 1-fachen und 100-fachen, insbesondere dem 1-fachen und 10-fachen, der Schwingungsdauer der hochfrequenten Grundschwingung der Hochfrequenzleistung liegt.

22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Hochfrequenzleistung das Substrat (10) mit einer zeitlichen Durchschnittsleistung von 5 Watt bis 100 Watt beaufschlagt, wobei die Maximalleistung eines einzelnen Hochfrequenzleistungspulses das 1-fache bis 20-fache, insbesondere das 2-fache bis 10-fache, der zeitlichen Durchschnittsleistung beträgt.

23. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz der eingekoppelten Hochfrequenzleistung zwischen 100 kHz bis 100 MHz, insbesondere 13,56 MHz, beträgt, und daß das Puls-zu-Pause-Verhältnis der eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulse zwischen 1 : 1 und 1 : 100, insbesondere 1 : 1 und 1 : 10, liegt.

24. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Pulsen der eingekoppelten Plasmaleistung und das Pulsen der über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistung oder das Pulsen des Magnetfeldes, das Pulsen der eingekoppelten Plasmaleistung und das Pulsen der über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistung zeitlich miteinander korreliert oder synchronisiert wird.

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß vor einem Hochfrequenzleistungspuls des ICP-Spulengenerators (17) zunächst das Magnetfeld angelegt, und daß das Magnetfeld nach dem Abklingen dieses Hochfrequenzleistungspulses wieder abgeschaltet wird.

26. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß während eines Hochfrequenzleistungspulses des ICP-Spulengenerators (17) die über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelte Hochfrequenzleistung abgeschaltet wird und/oder daß während eines über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulses die über den ICP-Spulengenerator (17) eingekoppelte Hochfrequenzleistung abgeschaltet wird.

27. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Synchronisation derart erfolgt,

daß das Substrat (10) jeweils während der Dauer eines über den ICP-Spulengenerators (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Plasmaleistungspulses mit über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulsen beaufschlagt wird. 5

28. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß die über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelte Hochfrequenzleistung jeweils während eines Leistungsanstieges und/oder eines Leistungsabfalles eines über den ICP-Spulengenerator (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspulses erzeugt wird. 10

29. Verfahren nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrelation derart erfolgt, daß während der Dauer der über den ICP-Spulengenerators (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Plasmaleistungspulse und während der Dauer der Pulspausen der einzelnen über den ICP-Spulengenerators (17) in das Plasma (14) eingekoppelten Plasmaleistungspulse das Substrat (10) jeweils mit mindestens einem über den Substratspannungsgenerator (12) in das Substrat (10) eingekoppelten Hochfrequenzleistungspuls beaufschlagt wird. 15 20 25

30. Verfahren nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Ätzen in alternierenden Ätz- und Passivierschritten bei einem Prozeßdruck von 5 µbar bis 100 µbar erfolgt. 30

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

35

40

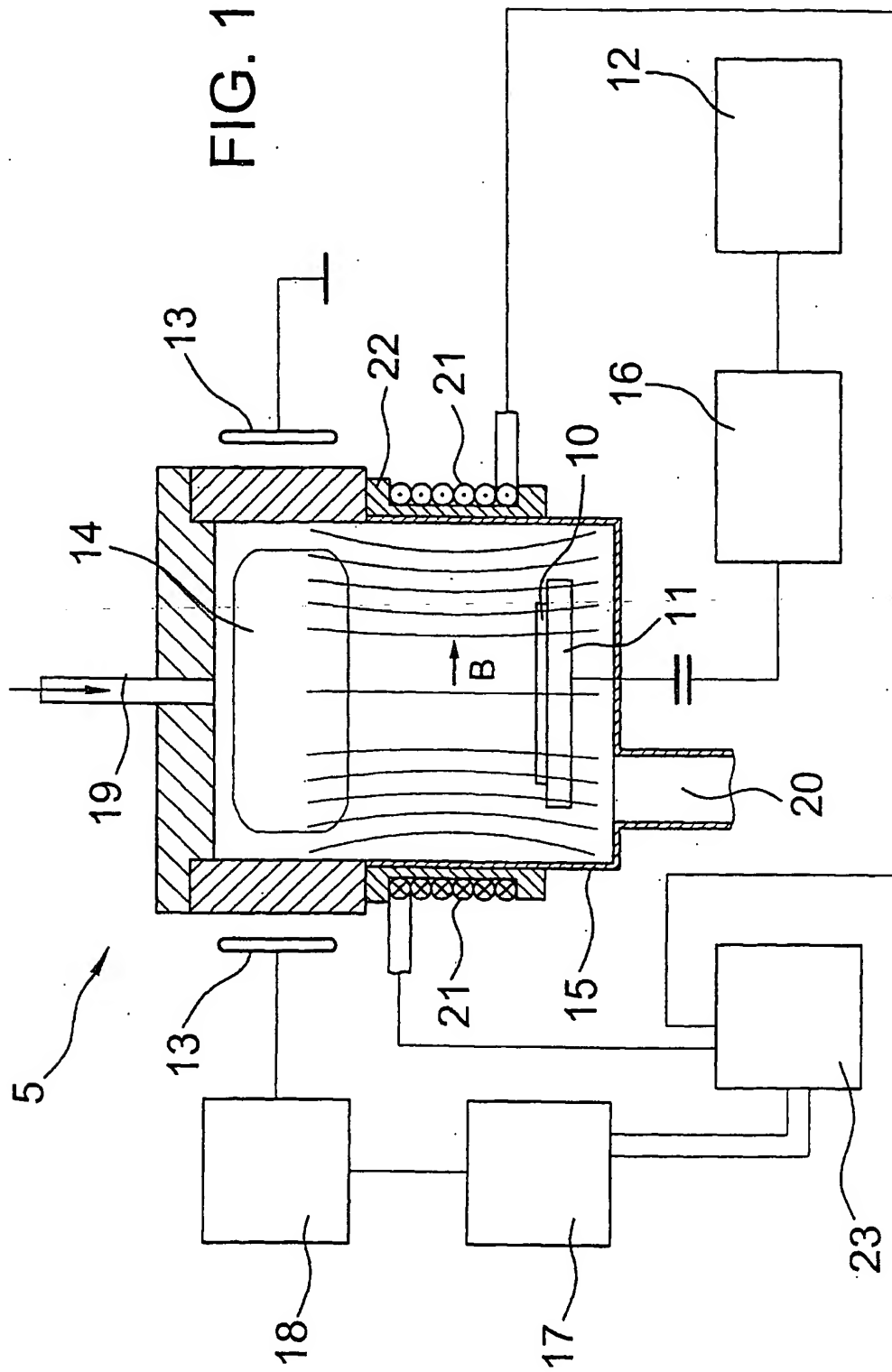
45

50

55

60

65



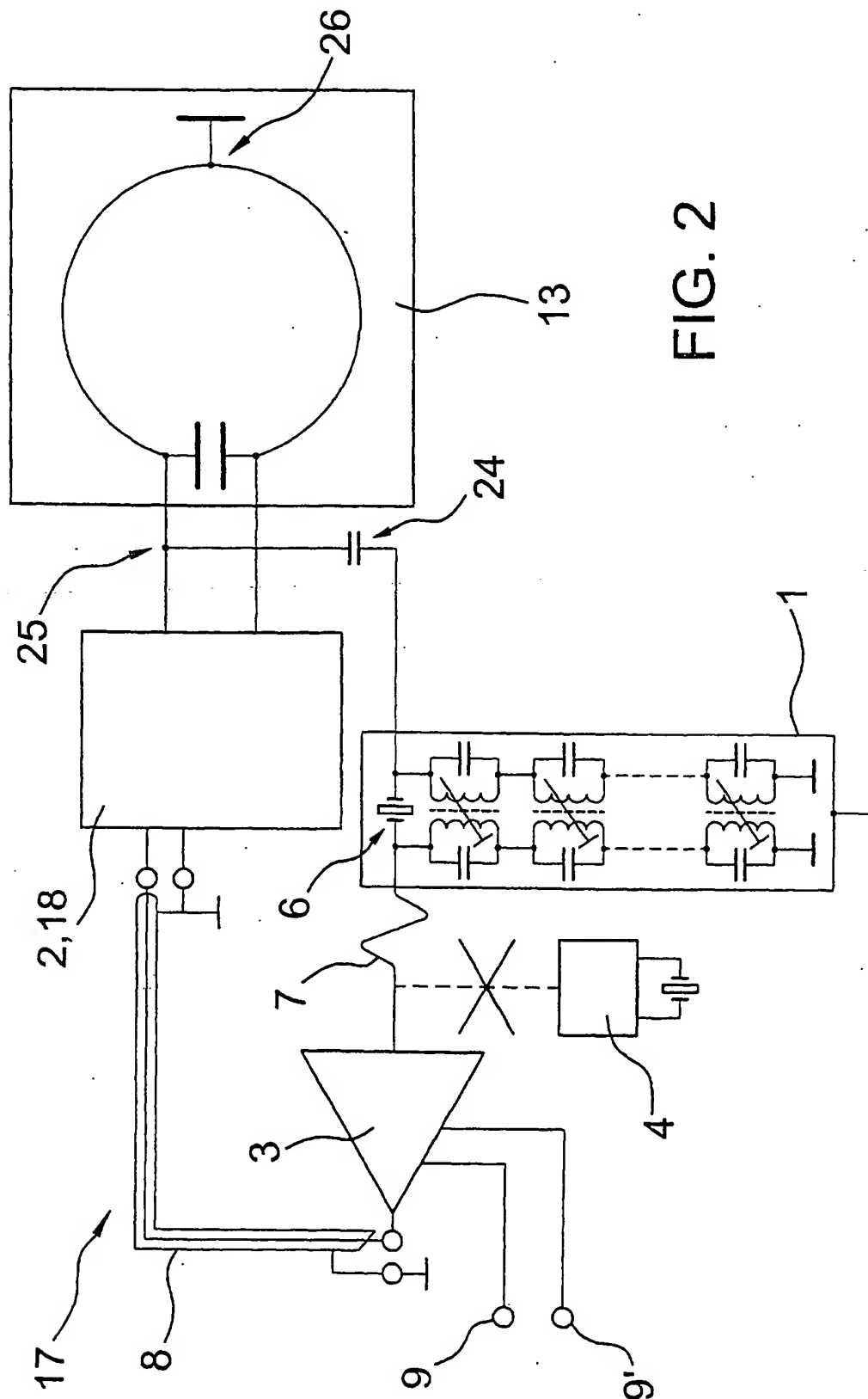


FIG. 2

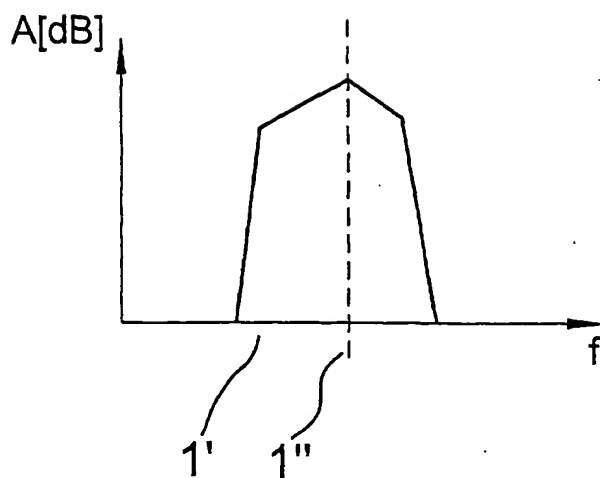
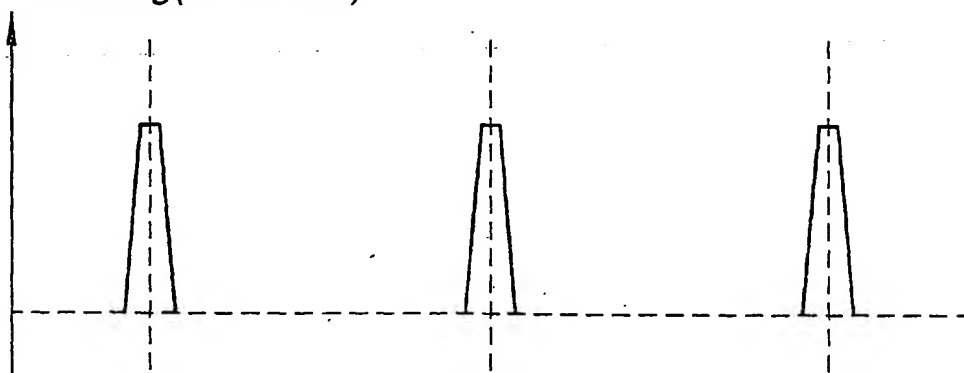


FIG. 3

Hochfrequenz-
Leistung(HF-Pulse)



Magnetspulen-
Strom(Strom-Pulse)

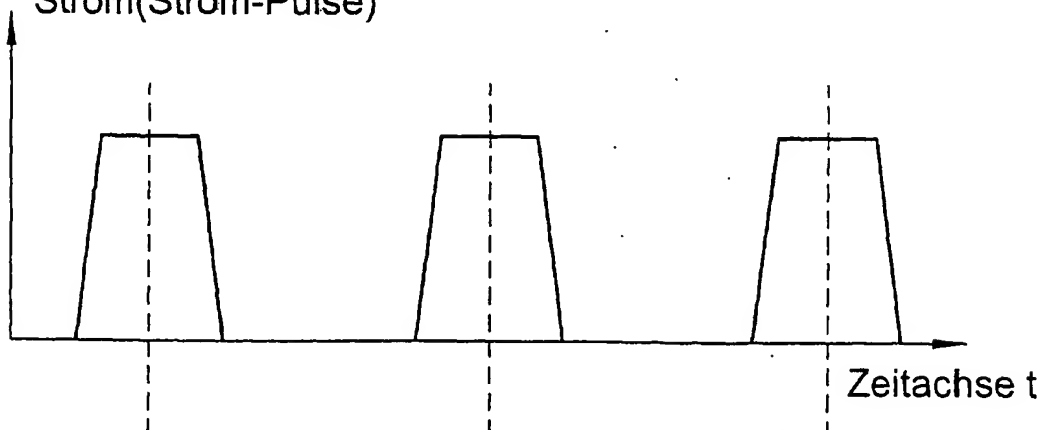


FIG. 4

